

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pompa adalah alat yang digunakan untuk memindahkan cairan (fluida) dari suatu tempat ke tempat yang lain, melalui media pipa (saluran) dengan cara menambahkan energi pada cairan yang dipindahkan dan berlangsung kontinu. Pompa beroperasi dengan prinsip membuat perbedaan tekanan antara bagian hisap (*suction*) dan bagian tekan (*discharge*). Perbedaan tekanan tersebut dihasilkan dari sebuah mekanisme misalkan putaran roda impeler yang membuat keadaan sisi hisap nyaris vakum. Perbedaan tekanan inilah yang mengisap cairan sehingga dapat berpindah dari suatu reservoir ke tempat lain.

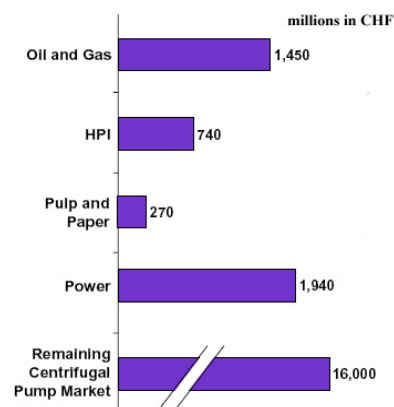
Pada jaman modern ini, posisi pompa menduduki tempat yang sangat penting bagi kehidupan manusia. Pompa memerankan peranan yang sangat penting bagi berbagai industri misalnya industri air minum, minyak, petrokimia, pusat tenaga listrik dan sebagainya. Penggunaan pompa jenis sentrifugal dapat dilihat pada Tabel 1.1 di bawah ini.

Tabel 1.1 Bidang penggunaan pompa sentrifugal

Penggunaan pompa sentrifugal	
Bidang energi	▪ Instalasi air masuk pusat tenaga
	▪ Instalasi kondensasi
	▪ Instalasi menara air
Bidang perminyakan	▪ Water injection
	▪ Sistem perpipaan minyak
	▪ Industri petrokimia
Bidang perairan	▪ Transportasi air laut
	▪ Penyedia air minum

	▪ Irigasi
	▪ Drainase
Industri umum	▪ Drainase pada pertambangan
	▪ Industri gula
	▪ Industri kertas
	▪ Desalinasi air laut

Menurut sebuah survey di Inggris yang dilakukan oleh Sulzer Pump, pompa sentrifugal melibatkan lebih dari 70% pasar pompa baru dengan total financial 16 miliar Swiss Franc. Karena itulah penelitian dan pengembangan bidang pompa sentrifugal terus dilakukan untuk meningkatkan kinerja pompa dan sisi manufakturnya. Kondisi ini bisa dilihat pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Perkiraan pasar baru pompa sentrifugal [1].

Sebuah pompa adalah alat mekanis yang digunakan untuk memindahkan cairan. Energi mekanik diubah menjadi energi pada hydraulic pompa itu. Dalam hal ini berhasil, sebuah pompa sentrifugal tersebut diuji dan digunakan dalam pembelajaran.

Salah satu hal yang perlu diperhatikan dalam penggunaan pompa sentrifugal adanya kemungkinan terjadinya kavitasi yang dapat menyebabkan penurunan kapasitas pompa sentrifugal yang berakibat kerusakan mekanis pada impeller pompa sentrifugal dan timbulnya getaran.

Kavitasi terjadi sebagai akibat dari tekanan fluida kerja pada sisi isap pompa sentrifugal yang mengalami penurunan tekanan hingga lebih rendah dari tekanan penguapan fluida kerja tersebut yang menyebabkan gelembung uap air, yang kemudian gelembung tersebut pecah karena mengalami tekanan yang lebih besar. Pompa sentrifugal yang dioperasikan dalam kondisi kavitasi akan menimbulkan suara bising dan getaran yang diakibatkan oleh gelembung - gelembung uap yang pecah secara kontinyu karena tekanan disekelilingnya [1].

Untuk mengetahui fenomena dari getaran pada pompa sentrifugal, peneliti memerlukan suatu alat yang dapat menginformasikan kepada pembaca. *Accelerometer* yang terpasang pada *Machine Faults Simulator* (MFS) merupakan salah satu alat yang dapat memberi informasi fenomena getaran pompa sentrifugal tersebut berupa signal getar berbentuk gelombang. Karena adanya kavitasi sangat berpengaruh pada pompa sentrifugal, maka peneliti ingin mengetahui fenomena getaran pada pompa sentrifugal terutama frekuensi getaran pada saat kavitasi.

1.2 Tujuan

Tujuan penulisan dari tugas akhir ini adalah:

1. Mengetahui fenomena getaran yang terjadi pada pompa sentrifugal pada saat kavitasi.
2. Mengetahui perbedaan fenomena getaran dalam kondisi normal dan kondisi kavitasi melalui perbandingan domain waktu dan domain frekuensi.
3. Mengetahui perbedaan fenomena kavitasi melalui grafik perbandingan NPSH dengan *head* dan debit aliran pompa.

1.3 Batasan Masalah

Dalam penyusunan tugas akhir ini penulis membatasi pada:

1. Fluida yang digunakan adalah air.
2. Variasi tutupan katup luaran tangki yang digunakan ketika aliran air keluar dari tangki adalah 0° , 30° , 45° , 60°
3. Variasi Rpm yang digunakan adalah 1400 rpm, 2400 rpm, 3000 rpm, 3600 rpm, pengambilan data dilakukan secara 3x dengan rpm yang mendekati rpm diatas tiap 5 detik.

1.4 Metode Penelitian

Metode penelitian yang dilakukan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Pustaka

Metode pengumpulan data dilakukan dengan mempelajari referensi-referensi yang berkaitan dengan penyusunan tugas akhir ini.

2. Asistensi dan Konsultasi

Konsultasi mengenai materi tugas akhir dan masalah-masalah yang timbul saat pengambilan data dengan dosen pembimbing.

3. Pengujian Laboratorium

Pengujian pada penelitian ini dilakukan di Training Center & Sains Teknologi Laboratorium Getaran dan Kontrol, Universitas Diponegoro Semarang.

4. Pengolahan dan Analisis Data

Melakukan pengolahan data dan analisis berdasarkan hasil yang diperoleh dengan menggunakan *software* bantu MATLAB 2008b.

1.5 Sistematika Penulisan

Laporan tugas akhir ini ditulis dalam 5 bab. Bab I pendahuluan berisi tentang latar belakang, tujuan penelitian, pembatasan masalah, metode penelitian dan sistematika penulisan. Bab II dasar teori berisi tentang pompa, pompa sentrifugal, kavitasi serta pengujian yang dilakukan. Bab III metode penelitian menjabarkan langkah-langkah penelitian dari awal sampai akhir yang termasuk di dalamnya tentang spesifikasi bahan, alat uji dan alat ukur, serta parameter-parameter pengujian yang digunakan. Bab IV analisis data dan pembahasan berisi data hasil pengujian yang telah di olah menggunakan *software* MATLAB 2008b yang berupa sinyal sinyal getaran dari domain frekuensi dan domain waktu. Bab V penutup berisi tentang kesimpulan dan saran.

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Latar Belakang

Pekerjaan yang luas telah dilakukan di bidang kavitasi. Namun dalam kajian pustaka ini terutama hanya mencakup kavitasi dalam pompa. Ini mencakup kavitasi dimana deteksi parameter berdasarkan analisa getaran dan beberapa parameter lainnya terkait sangat menarik saat ini. Sebuah latar belakang teoritis singkat dimana subyek pompa dan kavitasi.

2.2 Pompa Sentrifugal

Pompa sentrifugal adalah salah satu tipe pompa yang memanfaatkan energi kecepatan yang kemudian diubah menjadi energi tekanan sehingga dapat menggerakkan fluida cair dari lokasi sumber menuju lokasi target dengan menggunakan impeler. Jadi pompa sentrifugal pada prinsipnya dapat mengubah energi mekanik dalam bentuk kerja poros menjadi energi fluida oleh gerakan sudu – sudu yang ada dalam volute. Energi yang dihasilkan dapat menghasilkan head tekanan, head kecepatan dan head potensial pada fluida cair yang mengalir secara kontinu [2].



Gambar 2.1 Pompa sentrifugal.

2.3 Kavitasi pada Pompa

Fenomena kavitasi telah menarik perhatian para ahli sejak waktu lampau. Isaac Newton adalah orang pertama yang mengadakan observasi fenomena

kavitasi pada daerah tekanan rendah yang dibentuk diantara permukaan gelinding [1]. Seorang peneliti telah mendokumentasikan penelitian kavitasi yang terjadi pada propeller kapal yang mana sudah diselidiki oleh Reynolds jauh sebelum ujicoba kapal perusak ‘Daring’ pada tahun 1894. Hal ini menunjukkan bahwa fenomena kavitasi sudah menjadi bahan kajian dalam waktu yang sudah lama [3].

Beberapa melakukan penelitian terhadap perilaku dinamik dari pompa yang mengalami kavitasi. Penelitian ini mengkaji pengukuran *matrik transfer* dinamik terhadap pompa yang sehat dan yang mengalami kavitasi. Sebuah fungsi alih (*transfer*) mampu mengkonfirmasi adanya kavitasi yang secara teoritis dapat diterangkan dengan gambling [4].

Ada yang mempelajari kerusakan material pompa akibat kavitasi yang sering terjadi pada daerah lokal/tertentu. Daerah tersebut biasanya adalah daerah *trailing edge* pada roda impeller [5].

Penelitian selanjutnya dilakukan dimana melaporkan kerusakan kavitasi erosi berupa keausan yang terjadi pada sudu turbin hidrolis, roda impeller, propeller kapal, katup, pipa penukar kalor dan konstruksi hidrolis yang lain karena kontak dengan aliran berkecepatan tinggi dan perubahan tekanan. Kerusakan akibat kavitasi juga terjadi pada saat permukaan kontak dengan cairan dipengaruhi oleh getaran seperti yang terjadi pada silinder mesin diesel. Untuk pencegahan kavitasi, parameter yang perlu diperhatikan adalah ketahanan material, clearance dan kontrol getaran [6].

2.3.1 Tekanan

Sebuah penelitian mengemukakan bahwa NPSH proporsional terhadap H, dan efisiensi kavitasi dinyatakan dengan;

$$NPSHa = \frac{Pa - Pv}{\rho} + \frac{Ps}{\rho} + Hs + \frac{V^2}{2g} \dots \dots \dots (1)$$

$$H = Hs + \Delta Hp + His + \frac{V^2}{2g} \dots \dots \dots (2)$$

$$Q = v \left(\frac{\pi D^2}{4} - dD \right) \dots \dots \dots (3)$$

$$\Delta HP = \frac{Pd - Ps}{\rho g} \dots \dots \dots (4)$$

Dimana

- NPSHa = *net positive suction head* (m).
- H = total head (m)
- Pa = tekanan atmosphere (Pa)
- Pv = tekanan uap pada suhu 25° C (Pa)
- Ps = tekanan masukan pompa (Pa)
- Pd = tekanan luaran pompa (Pa)
- Hs = head static, perbedaan ketinggian permukaan air dengan masukan pompa (m)
- His = $f \frac{l}{2gD} v^2$, kerugian pompa (m)
- V = laju aliran (m/s)
- l = panjang akrilik (m)
- f = kekasaran permukaan akrilik
- g = gravitasi (m/s^2)
- ρ = massa jenis (kg/m^3)
- Q = debit aliran (m^3/s)
- D = diameter akrilik (m)

Analisis dimensional ini mengarah pada parameter yang berguna untuk memprediksi kinerja pompa ketika pompa dioperasikan.

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \dots\dots\dots(5)$$

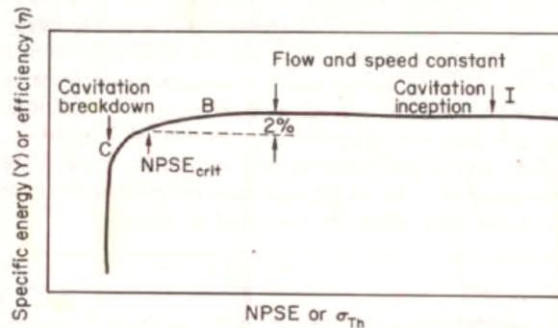
Dimana

- n1 = putaran motor kecil (Rpm)
- n2 = putaran motor besar (Rpm)

Beberapa peneliti mengemukakan pertanyaan tentang persamaan di atas bahwa kavitasi biasanya terjadi pada sisi hisap dari sebuah pompa [7].

Dilaporkan bahwa pompa mengalami kavitasi pada saat tekanan hisap turun terlalu rendah atau pada saat kecepatan fluida terlalu tinggi. Kavitasi terjadi pada saat tekanan local pada sisi hisap sudu turun mendekati tekanan uap dari fluida. Hal ini terjadi pada leading edge dari impeler. Net positive suction energy (NPSE)

kritis telah didefinisikan sebagai turunya head sebesar 2% dari kondisi karakteristik non-kavitasi yang terlihat pada Gambar 2.2 [8].



Gamabr 2.2 Karakteristik kavitasi pompa [8].

2.3.2 Laju aliran

Laju aliran pada pompa turun dengan cepat pada saat kavitasi terjadi. Ini jelas terlihat bahwa pada saat kavitasi terjadi kinerja pompa akan turun juga dengan cepat. Laju aliran bisa turun kurang dari setengah dari yang diduga. Aliran bisa menjadi indicator yang bagus pada saat terjadi kavitasi [9].

$$v = f \times \frac{d}{St} \dots \dots \dots (6)$$

Dimana

- f = frekuensi turbulen (Hz)
- St = Strouhal Number (0,21)
- D = diameter silinder (m)

2.3.3 Getaran

Telah dilakukan pengujian kavitasi pompa menggunakan analisis fitur getaran di lapangan. Kondisi kavitasi akan meningkatkan turbulensi melalui roda impeller yang mana akan menyebabkan kenaikan amplitude pada frekuensi sudunya. Pengetahuan ini menjadi sangat bermanfaat untuk bidang diagnosa fitur kavitasi pompa. Sebagai tambahan. Teknik analisis semisal *time averaging*, *envelope detection*, rata-rata peak, dan *pulse counting* sudah terbukti menampilkan karakteristik kavitasi menurut getaran [10].

Dilakukan penelitian mengenai pendekatan getaran untuk deteksi kavitasi yang digunakan di *quebec* tenaga air untuk melakukan kavitasi erosi pada *hydro-turbines*, pompa dan peralatan hidrolik lain seperti *heat exchangers* dan katup.

Kasus studi deteksi kavitas sangat besar pada turbin kaplan yang telah dilakukan. Getaran di induksi di kedua bawah bantalan dan telah dianalisis untuk mendeteksi terjadinya kavitas dan untuk mengukur agresifitas. Menurut kesepakatan yang sesuai dengan model tes yang telah diamati. Analisis semacam itu diperbolehkan untuk mengidentifikasi kondisi operasi yang terkait dengan risiko yang tinggi terjadinya erosi yang dapat diperhitungkan untuk mengoptimalkan kinerja atau operasi dari turbin tersebut untuk memperpanjang interval inspeksi dan perbaikan [11].

Telah dilakukan diagnosa kavitas di pompa sentrifugal menggunakan kebisingan dan tanda tanda getaran. Kavitas yang menyebabkan kenaikan pada tingkat getaran keseluruhan. Puncak Getaran dalam percepatan ini jauh lebih tinggi selama terjadi kavitas dibandingkan dengan saat kondisi normal. Tanda-tanda getaran dari kondisi kavitas dapat dibandingkan dengan kondisi normal (nonfault). Sebuah fungsi koherensi didefinisikan, sebagai hubungan linier antara kondisi kebisingan dan sinyal getaran dari pompa di atas frekuensi kisaran, bermaksud untuk berbagai macam kondisi kavitas pada pompa dan berhubungan dengan intensitas kavitas [12].

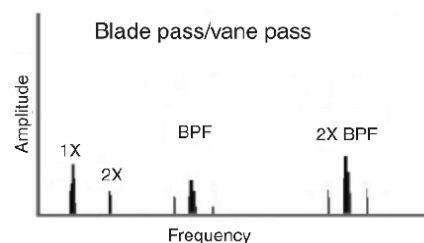
Telah dilakukan studi tentang deteksi kavitas pada hidrolik turbin berdasarkan analisis struktural getaran, akustik emisi dan tekanan *hydrodynamic* yang diukur dalam mesin. Pendekatan ini sangatlah menguntungkan karena *hydropower* tidak terpengaruh. Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi deteksi kavitas dalam turbin hidrolik yang sebenarnya. Penelitian ini berfokus pada aspek yang paling penting mengenai kavitas. Teknik utama yang mempelajari sinyal atau spektrum frekuensi tinggi dan amplitudo *demodulation* untuk sebuah band frekuensi tertentu. Melakukan deteksi bukanlah tugas yang sangat mudah karena dipengaruhi oleh desain turbin dan kondisi operasi, jenis kavitas, dan perilaku yang berbeda pada setiap letak terjadinya kavitas. Ini karena terpengaruh oleh sifat eksitasi dan jalur transmisi yang menentukan bentuk yang ditindaklanjuti oleh sensor. Agar hasil yang diperoleh untuk berbagai jenis kavitas ditemukan di setiap mesin [13].

2.3.3.1 Blade pass frequency (BPF)

Blade pass frequency pada Gambar 2.3 merupakan karakter dari pompa dan baling-baling. Frekuensi ini melekat pada pompa, menyebabkan tingkat kebisingan yang sangat tinggi. namun amplitudo besar pada BPF (harmonik) dapat dihasilkan jika pompa mengalami perbedaan kecepatan pada putaran baling baling pompa dan diffuser.

$$\text{BPF} = \frac{\text{number of blade/van}}{60} \times \text{RPM} \dots \dots \dots (7)$$

BPF kadang-kadang dapat muncul ketika frekuensi alami sistem menyebabkan getaran tinggi.



Gambar 2.3 Blade pass frequency.

Dalam pompa sentrifugal, perbedaan antara ujung impeller dan volute atau diffuser inlet adalah memiliki persentase tertentu (berkisar antara 4-6% diameter impeller), tergantung pada kecepatan pompa. Jika perbedaan kurang dari nilai yang direkomendasikan, dapat menghasilkan suara yang menyerupai kavitasi. Namun, plot FFT segera akan menyoroti frekuensi pass baling-baling impeller. Juga pada saat BPF (harmonik) dapat terjadi saat kondisi sistem pada frekuensi alami dan akan menyebabkan getaran yang tinggi.

Seperti pada kondisi yang sebelumnya *blade pass frekuensi*, pompa sentrifugal yang dikenal untuk menghasilkan *sub-synchronous* nonspesifik atau bahkan *supersynchronous* (lebih besar dari 1 % frekuensi tersendiri). Ini adalah kejadian yang sangat langka, tapi dalam semua kemungkinan kondisi tersebut dapat terjadi dalam dua tahap (atau lebih tinggi) pada pompa, yang memiliki *interstage bushing* yang dapat bertindak sebagai tambahan kekakuan komponen dari pompa. Peningkatan dari kehilangan tenaga atau ketika pompa itu kelelahan (*interstage*

bushing) dalam hal ini dapat mengarah pada penurunan kekakuan dan hal tersebut dapat meningkatkan getaran.

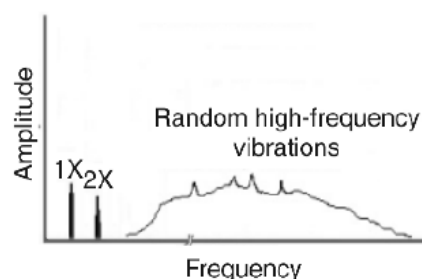
Dalam dua-tahap yang terjadi pada impeller pompa, *interstage bushing* memainkan peran penting dalam memberikan kekakuan, yang digambarkan sebagai efek lomakin. Ketika kehilangan yang sangat tinggi, efek ini dapat menguranginya sehingga dapat menghasilkan frekuensi tinggi serta amplitudo *supersynchronous* dihasilkan. Setelah *clearance* disesuaikan kembali ke normal, operasi pompa dapat distabilkan dan frekuensi cacat menghilang [14].

2.3.3.2 Kavitasi

Kavitasi seperti pada Gambar 2.4 biasanya terjadi secara random (acak) pada frekuensi tinggi yang mana ditunjukkan dengan BPF harmonik. Jika tekanan cairan dibawah tekanan atm akan menimbulkan timbulnya gelembung-gelembung pada cairan tersebut.

Kavitasi dapat menyebabkan kerusakan pada pompa dan mengurangi kerja pompa. Setiap dari gelembung-gelembung menghasilkan semacam dampak yang cenderung dapat menghasilkan getaran secara acak pada frekuensi tinggi.

Kavitasi dapat sangat merusak komponen *internal* pompa jika dibiarkan secara terus menerus. Hal ini sering terjadi dan berakibat terjadinya erosi pada baling-baling impeller pompa. Kavitasi sering terdengar seperti kerikil yang melewati pompa. Pengukuran untuk mendeteksi kavitasi biasanya tidak diambil pada bantalan pompa tersebut, tetapi lebih pada pipa atau pompa bagian hisap dari *casing* tersebut.



Gambar 2.4 Kavitasi.

Pengukuran kavitasi ini merupakan pengukuran yang diakui oleh pengamat dalam mengamati kompleks gelombang atau secara dinamis oleh variasi tekanan

dengan menggunakan suatu *oscilloscope transducer* tekanan. Tekanan yang memiliki gelombang sinusoid adalah bukan, akan tetapi amplitudo maksimum muncul dengan sangat tajam. Perbedaan antara keduanya merupakan amplitudo yang rendah, halus dan bulat puncak [14].

2.3.3.3 *Fast Fourier Transform (FFT)*

Dalam sebuah penelitian pada pompa dan pipa saat pengukuran getaran dalam membangun layanan, kavitasi adalah terjadi sangat jelas dan ditandai oleh getaran frekuensi tinggi secara acak (biasanya dari 150 Hz untuk 5000 Hz) dalam spektrum frekuensi getaran dalam pipa dan pompa digunakan dalam jasa pembangunan. Pengukuran di atas dilakukan pada semua pompa dan diulang pada saat melakukan pengukuran secara berkelanjutan pada letak sebelum dan setelah perbaikan dilakukan. Desain sistem pipa yang terjadi saat kavitasi, memiliki perbedaan sinyal getaran atau tidak relevan setelah dilakukan perbaikan [15].

Beberapa penelitian yang dilakukan menyarankan bahwa analisis *fourier* yang berbasis tidak ideal untuk kavitasi data. Ini bisa jadi karena sifat acak saat terjadinya fenomena kavitasi. Karena keterbatasan luas bidang maka frekuensi dari sistem akuisisi data dan sifat acak dari frekuensi akan menurun, dimana sinyal-sinyal transient membentuk gelombang. Hasil ini merupakan identifikasi dan deteksi peristiwa kavitasi dan merupakan sebuah karakteristik *time-frequency* dalam sinyal *vibroacoustic* [16].

Dalam laporan Jarrell (2003), data getaran yang dilakukan di *Ice Harbor Dam Auxilliary Water Supply Pumps*. Didapat beberapa sinyal getaran yang kemudian dianalisis dengan *Fast Fourier Transform* (FFT). Getaran pengukuran dilakukan dalam beberapa kisaran frekuensi 0-100 Hz, 0-1000 Hz dan 0-100 kHz. Pada pompa tampaknya nilai nominal dari amplitudo maksimum pada percepatan -16db dapat ditemukan dengan beberapa ciri-ciri yang unik dalam plot *Fast Fourier Transform* (FFT). Beberapa bagian-bagian mesin utama yang digunakan sebagai landasan permukaan untuk memastikan penempatan transmisi sinyal getaran. Didapat sinyal getaran yang tidak sesuai seperti pada frekuensi tinggi, mengakibatkan getaran secara acak yang disajikan dalam laporan [17].

Telah dikembangkan metode untuk mendeteksi terjadinya kavitasi dan mengevaluasi pengaruhnya pada pipa, untuk mencegah masalah pada sistem perpipaan disebabkan oleh kavitasi erosi dan getaran. Kavitasi memiliki perilaku divisualisasikan dan dibandingkan dengan *output* dari sebuah *accelerometer* yang dipasang di dalam pipa sebagai studi awal. Sebagai hasilnya, gelombang sinus-seperti sinyal dengan frekuensi dengan kisaran antara 20-30 kHz terdeteksi. Selain itu, distribusi *accelerometer output* sepanjang arah aliran dengan tingkat erosi yang diukur serta dengan pengujian erosi akan dibandingkan. Beberapa lebih setuju antara satu sama lain, dan menyarankan bahwa distribusi tingkat erosi mungkin akan lebih ideal dievaluasi dengan *accelerometers* yang berada pada luar pipa. Oleh karena itu pada daerah tertentu dari data di dalam pipa dianggap tersedia melalui penggunaan *accelerometers* [18]. Dilaporkan bahwa terlihat sebuah perbedaan dalam spectrum *Fast Fourier Transform* (FFT) sebelum dan selama kavitasi. Analisis getaran frekuensi komponen menunjukkan bahwa kenaikan getaran itu terutama di frekuensi yang lebih tinggi (lebih dari 1000 hz) dan itu broadband di alam. Penelitian percobaan menunjukkan bahwa perubahan yang paling nyata akan di frekuensi tinggi broadband puncak terkait dengan peningkatan acak getaran [19].

2.4 Condition Based Monitoring

Condition Monitoring adalah suatu metode yang dilakukan dengan memonitor kondisi sistem pada waktu tertentu untuk memprediksi kondisi sistem pada masa yang akan datang dengan mengoleksi dan meng-extract informasi dari sistem seperti getaran, temperature, lingkungan dan analisis lubricant [22]. Metode CBM memungkinkan untuk mengetahui kondisi internal dari sistem ketika sistem tersebut beroperasi. *Vibration Based Condition Monitoring* merupakan salah satu metode CBM, sebuah sistem mekanis pada kondisi standar memiliki tanda – tanda getaran yang wajar. Ketika terjadi kejanggalkan sistem akan mengeluarkan getaran yang berbeda pada kondisi standar, tanda ini dapat digunakan untuk mendeteksi kegagalan pada sistem (*fault detection*). *Fault detection* dapat dilakukan dengan membandingkan *trend* hasil pengukuran sinyal dari sistem dengan sinyal pada saat kondisi normal. Pada *Vibration Based*

Condition Monitoring analisis sinyal getaran merupakan hal yang sangat penting. Kategori utama dari analisis sinyal getaran diantaranya *frequency domain* dan *time frequency domain*.

2.4.1 *Frequency domain*

Frequency domain analysis dilakukan dengan mengubah sinyal gelombang *time domain* ke dalam *frequency domain*. Metode yang paling umum digunakan untuk konversi dari time ke frekuensi domain adalah dengan menggunakan *fast fourier transform* (FFT).

a. FFT

Fast fourier transform merupakan sebuah metode yang digunakan untuk mempercepat konversi dari time domain ke frekuensi domain dari *Discrete Fourier Transform* (DFT). Untuk mengubah sinyal diskrit $g(i)$ menjadi sinyal dalam domain frekuensi $G(i)$ digunakan formula DFT [23]:

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{\frac{-2\pi i n k}{N}} \quad k = 0, \dots, N - 1 \dots \dots \dots (8)$$

Atau dalam bentuk matriks

$$X_k = \frac{1}{N} W_{kn} x_k \quad X_k = [X_0, \dots, X_{N-1}] \text{ dan } x_k = [x_0, \dots, x_{N-1}] \dots \dots \dots (9)$$

2.4.2 *Time – frequency*

Analisis *time – frequency* mengkombinasikan kedua sinyal time domain dan frekuensi domain sehingga hal ini memungkinkan untuk dapat mengetahui *feature transient* seperti dampak dan kegagalan. Analisis *time – frequency* juga memungkinkan untuk memonitoring frekuensi terhadap waktu. Metode yang biasa digunakan untuk analisis ini adalah *Short Time Fourier Transform* (STFT) dan *Wigner-Ville Distribution* (WVD) [24].

a. *Short Time Fourier Transform*

STFT dilakukan dengan cara memindahkan *time windowing* sepanjang pengukuran dan mendapatkan *fourier spectrum* sebagai fungsi dari pergeseran waktu (*time-shift*). Namun STFT mempunyai masalah dengan resolusi karena adanya ketidakpastian dalam suatu *time window*. Rumus dari STFT ditunjukkan di bawah ini ;

$$S(f, t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t - \tau)\exp(-j2\pi ft)dt \dots\dots\dots(10)$$

Dimana $w(t)$ merupakan *windowing* yang berjalan sepanjang waktu pengukuran. *Window* dapat berupa *finite length* seperti *Hanning window* atau *infinite length* seperti *Gaussian window*.

b. *Wigner-Ville Distribution*

Tak seperti STFT, WVD dapat menghilangkan efek ketidakpastian sehingga mempunyai resolusi yang lebih tinggi daripada STFT [25].

$$C_x(t, f, \phi) = \Im[R(t; \tau)] \dots\dots\dots(11)$$

$$R(t; \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x\left(u + \frac{\tau}{2}\right)x^*\phi((t - u), \tau) du \dots\dots\dots(12)$$

2.5 Tujuan Tinjauan Pustaka

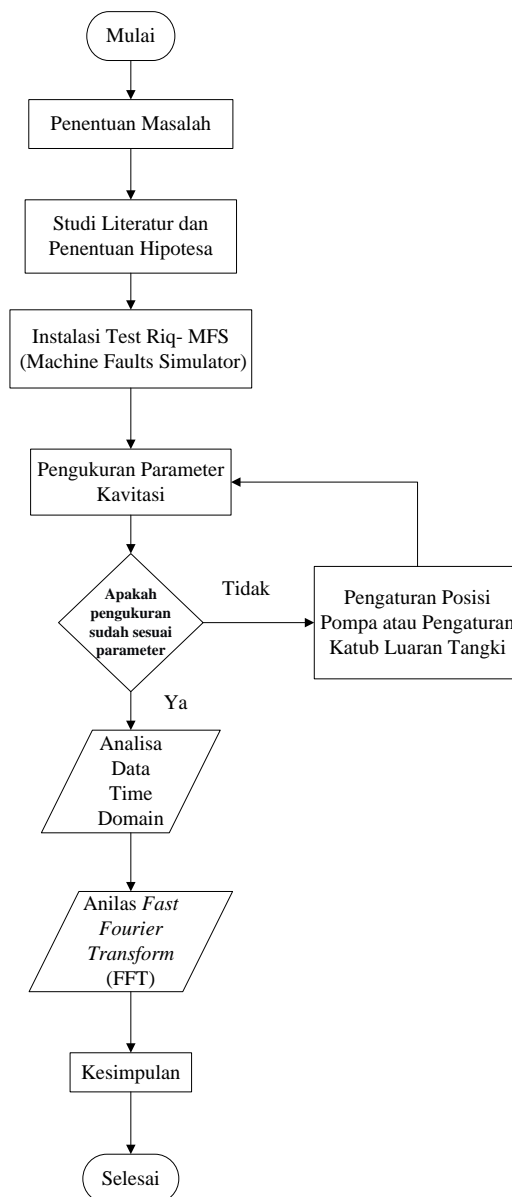
Penelitian secara ekstensif telah dilakukan pada berbagai subjek dalam mendiagnosa kondisi saat terjadi kavitasi. Oleh karena itu studi efektivitas dan kelayakan pada metode ini untuk mendeteksi kavitasi sangat bermanfaat. Akan digunakan proses pengolahan data dengan menggunakan *Fast Fourier Transform* karena dianggap memiliki ketepatan dalam berbagai studi yang dilakukan.

BAB III

METODE PENELITIAN

Metode penelitian dirancang untuk bisa memformulasikan diagnosa kavitasi pada pompa sentrifugal dengan sinyal getaran. Untuk mencapai tujuan ini, pendekatan eksperimen di tingkat laboratorium dilakukan untuk mensimulasikan kondisi di lapangan. Diagram alir metologi penelitian disakikan pada Gambar 3.1.

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.

Seperangkat tes rig kavitasi pompa digunakan dengan mengevaluasi semua parameter yang disebutkan di atas. Kondisi getaran akan di ukur dan dianalisa menggunakan *FFT analysis*.



Gambar 3.2 Instalasi eksperimen pompa sentrifugal terjadinya kavitasi.

3.2 Tinjauan Tentang FFT Analysis

Fast Fourier Transform (FFT) adalah sebuah algoritma untuk mendapatkan *Discrete Fourier Transform* dengan waktu perhitungan lebih singkat. Publikasi pertama dari FFT dilakukan oleh Tukey dan Cooley pada tahun 1965. Metode ini mengubah sinyal waktu menjadi frekuensi domain. *Fast Fourier Transform* (FFT) sangat penting untuk diagnosis dan pemantauan kondisi suatu mesin.

Getaran adalah perilaku dari sebuah komponen mesin mekanik seperti mereka bereaksi terhadap gaya internal dan eksternal. Ketika menganalisis getaran, ada dua komponen sinyal getaran yang akan dianalisis yaitu frekuensi dan amplitudo. Amplitudo dari getaran bisa disajikan dalam perpindahan, kecepatan dan percepatan.

Pengukuran perpindahan sangat sering dilakukan untuk unit pengukuran dalam rentang frekuensi kurang dari sekitar 10 Hz. Disisi lain pengukuran kecepatan pada kisaran frekuensi 10 - 2000 Hz. Selain itu, pengukuran percepatan dilakukan pada rentang frekuensi yang lebih tinggi. Sebagai sinyal getaran kavitasi cenderung muncul pada frekuensi yang lebih tinggi, dimana getaran dalam pengukuran percepatan harus sesuai dengan spektrum FFT agar terlihat secara jelas [14].

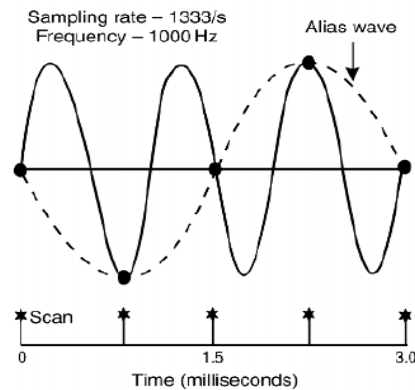
3.3 Tinjauan Tentang Sampling dan Aliasing

Gambar 3.3 *Sampling* adalah proses perekaman amplitudo gelombang secara otomatis, dan kemudian menghasilkan kurva dari poin yang sudah direkam. Dengan demikian, data sampel dikumpulkan *discrete poin* (digital) digunakan untuk merekonstruksi gelombang, yang pada awalnya dalam bentuk sinyal analog. Jika gelombang digital direkonstruksi harus terlihat mirip dengan gelombang asli, seberapa cepat harus direkam amplitudonya, atau dengan kata lain, mengambil sampel sehingga gelombang *digitized* merupakan bagian dari sinyal analog.

Penyelesaian ini terletak pada teorema *Nyquist sampling*, yang menyatakan bahwa untuk tidak kehilangan informasi yang terkandung dalam sinyal sampel, kita harus menyeleksi pada tingkat frekuensi setidaknya dua kali komponen frekuensi tertinggi yang sangat menarik.

Fenomena untuk gambar 3.3 pembentukan gelombang frekuensi rendah karena *under sampling* disebut *aliasing*. Semua data yang disimpan/dianalisis secara otomatis memilih tingkat *built-in sampling* untuk memastikan bahwa *aliasing* tidak terjadi. Secara teori, seharusnya ada atau tidak ada getaran dengan frekuensi lebih dari setengah dari tingkat *sampling* ini. Namun, ini tidak pernah dapat dipastikan dalam praktek.

Oleh karena itu semua analisis dilengkapi dengan *anti-aliasing filter*. Ini adalah elektronik *low-pass filter*, yang memungkinkan untuk frekuensi rendah agar bisa terdeteksi dengan frekuensi yang lebih tinggi. *Filter* yang menghilangkan semua getaran pada sinyal analog yang memiliki frekuensi yang lebih besar dari setengah *sampling rate*. *Filter* ini secara otomatis dipindahkan ke nilai-nilai yang tepat sebagai frekuensi *sampling* atau berubah (hal ini terjadi ketika rentang frekuensi *Analyzer* diubah oleh pengguna). Sangat penting untuk dicatat bahwa penyaringan telah terjadi sebelum digitalisasi analog dimulai [9].



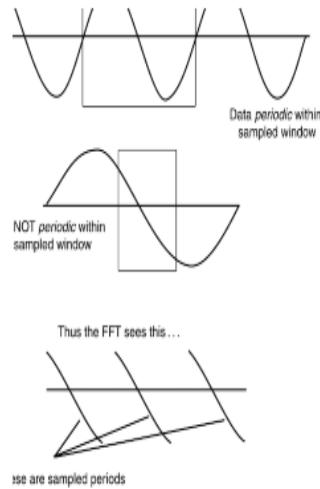
Gambar 3.3 *Sampling rate* dan *alias wave*.

3.4 Tinjauan Tentang *Window*

Setelah sinyal didapat kemudian sinyal digital diolah menggunakan sebuah A/D converter, langkah berikutnya dalam proses (sebelum itu dapat dikenakan pada algoritma FFT) disebut *windowing*. harus diterapkan pada data untuk meminimalkan sinyal agar efek *leakage* tidak didapat. *Windowing* adalah setara dengan mengalikan sampel sinyal dengan fungsi jendela panjang yang sama.

Ketika sinyal analog ditangkap, itu adalah sampel dengan interval waktu yang tetap. Sampling interval dapat menyebabkan gelombang aktual untuk mendapatkan dipotong di awal dan akhir waktu yang tetap. Hasil yang diperoleh dapat bervariasi dengan lokasi sampel sehubungan dengan gelombang periode. Hal ini mengakibatkan diskontinuitas regulasi gelombang terus menerus. *Windowing* mengisi diskontinuitas data dengan memaksa data sampel ke nol di awal dan di akhir periode sampling.

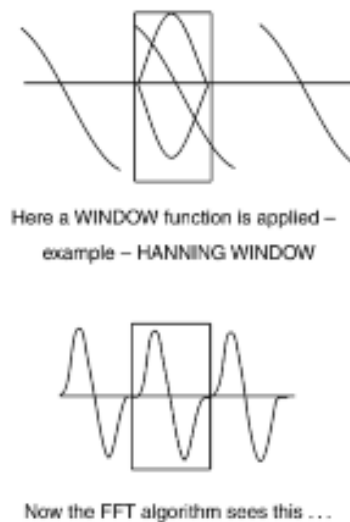
Gambar 3.4 menunjukkan efek *windowing*. *Windows* dapat dianggap sebagai cara untuk mengisi diskontinuitas data dengan memaksa data sampel ke nol pada awal dan akhir periode (atau jendela waktu), sehingga membuat periode sampel yang tampaknya terus-menerus. Ketika sinyal tidak *windowed* dan terputus-putus, *leakage* kesalahan terjadi ketika diterapkan pada algoritma FFT.



Gambar 3.4 Prinsip *windowing*.

Algoritma FFT melihat diskontinuitas sebagai modulasi frekuensi (berbagai) dan itu menunjukkan sebagai sidebands dalam spektrum ketika tidak ada frekuensi tersebut benar-benar ada dalam sinyal. Penggunaan *windows* juga mempengaruhi kemampuan untuk mengatasi frekuensi berdekatan sambil berusaha menjaga keakuratan amplitudo. Namun, dimungkinkan untuk mengoptimalkan satu dengan mengorbankan yang lain.

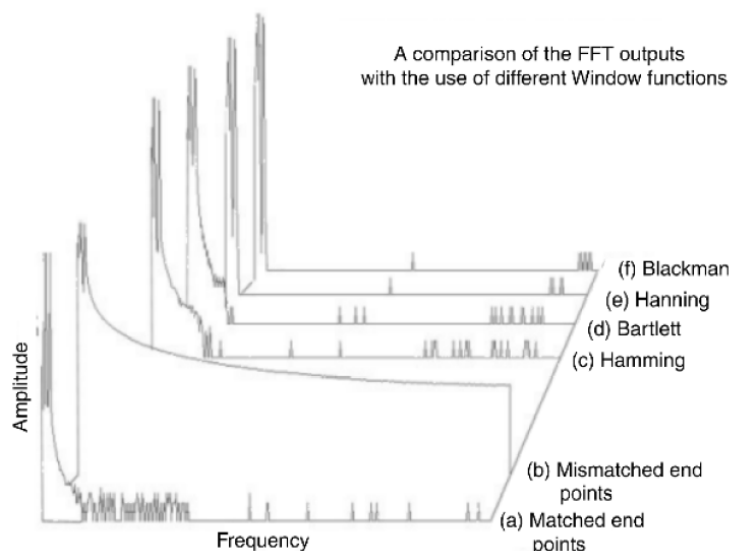
Umumnya, hanya fungsi tiga jendela yang disebutkan di atas tersedia dalam kebanyakan analisis.



Gambar 3.5 Fungsi *windowing*.

Ketika aplikasi jendela *flat top* dibandingkan bila diterapkan tanpa jendela (jendela persegi panjang atau seragam), puncak yang diamati pada FFT. Jendela *hanning* juga mengakibatkan memperluas puncak, tetapi untuk tingkat yang lebih rendah dari puncak datar. Membedakan antara dua frekuensi yang sangat dekat menjadi sangat sulit karena luasnya puncak. Ketika tujuan adalah untuk mengidentifikasi adanya komponen sinyal (puncak) di frekuensi tertentu, terbaik untuk menerapkan jendela persegi panjang untuk melakukan analisis. Tapi, jika besarnya puncak penting, jendela *flat top* jelas yang terbaik pada gambar 3.6.

Jelas, persegi panjang maupun flat top adalah solusi terbaik. Solusi nyata tergantung pada tujuan dari analisis. Untuk sebagian besar aplikasi, solusi terbaik sebenarnya berarti pengolahan data dalam sejumlah cara yang berbeda. Untuk hasil yang pertama, jendela *hanning* biasanya dipilih secara *default*, karena menyediakan baik amplitudo resolusi puncak antara sampah serta memperluas minimal puncak [9].



Gambar 3.6 Macam-macam *windowing*.

3.5 Peralatan Penunjang Dalam Penelitian

- a) *Machine Faults Simulator* (MFS)

MFS adalah alat yang digunakan untuk memperoleh pemahaman tentang perbedaan sinyal getaran, dimana terdapat beberapa komponen penunjang saat MFS dioperasikan dalam pengambilan data. MFS juga bisa digunakan untuk mensimulasikan atau mendiagnosa sebuah permasalahan suatu komponen mesin industri dalam skala eksperimen yang terkontrol agar dapat dikembangkan serta ditingkatkan dan semuanya dirancang untuk mudah diganti dalam berbagai eksperimen.



Gambar 3.7 *Machine Faults Simulator (MFS)*.

b) Pompa Sentrifugal *Oberdorfer 60P*

Pompa sentrifugal *oberdorfer 60P* adalah alat yang digunakan untuk melakukan pengujian fenomena kavitasi yang dipasang pada MFS. Untuk spesifikasi dari pompa sentrifugal *oberdorfer 60P* adalah sebagai berikut:

- Bahan : Perunggu
- Model : Oberdorfer 60P
- Aliran : 24 GPM Max
- Tekanan : 23 PSI Max, 53 *feet of head*
- *Impeller* : Sentrifugal
- *Made In* : USA



Gambar 3.8 Pompa Sentrifugal Pengujian.

c) *Sensor Accelerometer*

Sensor *accelerometer* adalah alat yang dipasang pada pompa sentrifugal dimana untuk mengetahui sinyal getaran saat kondisi normal dan kavitasi pada pompa sentrifugal. Untuk spesifikasi dari sensor *accelerometer* adalah sebagai berikut:

- Model : 3055B2 DYTRAN INSTRUMENT, INC
- S/N : 11885
- *Ref. Sensitivity* : 103,69 mV/g
- Temperatur : -60 - 250° F
- Akurasi : 2.00 +/- % FS
- Teknologi : Piezoelectric
- Akselerasi : -50.00 - 50.00 g
- Getaran Minimal : 400 g
- Sumbu pengukuran: Single
- Pemasangan : Menempel
- Getaran Maksimal : 2000 g
- *Range Frekuensi* : 1 - 10000 Hz



Gambar 3.9 Sensor Accelerometer.

d) *Inverter Speed Control*

Inverter speed control adalah variabel frekuensi *inverter* yang digunakan untuk mengontrol kecepatan secara elektronik motor AC induksi. Untuk spesifikasi dari *inverter speed control* adalah sebagai berikut:

- Model : Lenze AC Tech Controller
- Frekuensi Maksimal: 84,5 Hz
- Made in : USA



Gambar 3.10 Inverter Speed Control.

e) *Tachometer Digital Display*

Tachometer digital display adalah alat yang digunakan untuk menunjukkan besar nilai rpm motor yang berputar. Untuk spesifikasi dari *tachometer digital display* adalah sebagai berikut:

- Model : Lattice Instrument, Inc

- Tegangan : 24 Volt DC
- Rpm Maksimal : 0 – 6000 rpm
- Made in : USA



Gambar 3.11 *Tachometer Digital Display.*

f) Laptop Data Akuisisi

Laptop data akuisisi adalah perangkat yang dihubungkan dengan data akuisisi dengan software *Vibra quest* untuk memperoleh data yang sudah di akuisisi oleh *DAQ spectra quest*. Untuk spesifikasi dari laptop data akuisisi adalah sebagai berikut:

- Model : Lenovo ThinkPad T510, Core i5, vPro
- Software : Vibra Quest
- Made in : USA



Gambar 3.12 Laptop Data Akuisisi.

g) DAQ (*Compact SpectraPAD*)

Compact SpectraPAD adalah sebuah perangkat yang digunakan untuk mengakuisisi sinyal getaran yang terdapat pada komponen mesin yang di uji MFS. Dimana dihubungkan dengan kabel BNC. Untuk spesifikasi dari DAQ (*Compact SpectraPAD*) adalah sebagai berikut:

- Model : Compact SpectraPAD (PCL), Spectra Quest™
- 4 – 8 masukan sinyal Analog
- Resolusi 24-bit, 110 dB rentang dinamis
- Tegangan : 12 Volt DC
- Made In : USA



Gambar 3.13 DAQ (*Compact SpectraPAD*).

h) Kabel *Bayonet Naur Connector* (BNC) dan *Connector*

Perangkat yang digunakan untuk menyalurkan sinyal getaran dari sensor *accelerometer* menuju DAQ.



Gambar 3.14 Kabel *Bayonet Naur Connector* (BNC) dan *Connector*.

i) Sumber Arus

Sumber arus ini adalah perangkat yang mampu menghasilkan arus yang tetap, tidak bergantung pada tegangan dari sumber arus tersebut. Untuk spesifikasi dari sumber arus ini adalah sebagai berikut:

- Model : 4103C Current Source DYTRAN INSTRUMENT, INC
- Made In : USA



Gambar 3.15 Sumber Arus.

j) Motor Elektrik

Motor elektrik adalah alat yang digunakan untuk memutar impeller dari pompa sentrifugal dimana putaran motor diatur oleh *Inverter Speed Control*. Untuk spesifikasi dari motor elektrik adalah sebagai berikut:

- Model : JVC – 56T34F5301J P SpectraQuest, Inc
- Phase : 3Ph
- Tipe : TS
- Rpm Maksimal : 6000 rpm
- Made In : USA



Gambar 3.16 Motor Elektrik.

a) *Pressure Gage*

Pressure gage adalah alat yang digunakan untuk mengukur besar tekanan pada pompa sentrifugal pada sisi hisap dan sisi luar, saat kondisi normal maupun kondisi kavitasi.

- Model : ASME 4.01, ASHCROFT, INC



Gambar 3.17 *Pressure Gage*.

b) Tangki dan Katub

Tangki adalah tempat untuk menampung fluida air yang digunakan untuk pengujian fenomena kavitasi pada pompa sentrifugal. Sedangkan katub berfungsi mengatur aliran atau debit fluida air yang keluar dan masuk tangki.



Gambar 3.18 Tangki dan katub.

3.6 Prosedur Pengambilan Data

3.6.1 Pengambilan Data

Kondisi yang diambil pada saat melakukan pengujian adalah dengan memvariasikan putaran pompa dan variasi tutupan katub pada luaran tangki. Beberapa kondisi putaran pompa yang berbeda dimaksudkan untuk mengetahui terjadi atau tidaknya fenomena kavitasi pada putaran lambat, menengah dan tinggi. Variasi katub pada luaran tangki juga dilakukan untuk mensimulasikan terjadinya kavitasi pada kondisi tekanan tertentu sesuai dengan besar bukaan katup luaran tangki. Variasi kecepatan putaran pompa dibuat meningkat antara 1400 rpm, 2400 rpm, 3000 rpm dan 3600 rpm, sedangkan variasi tutupan katub luaran tangki adalah 0° , 30° , 45° dan 60° . Tutupan katub pada luaran tangki 0° berarti katub tersebut terbuka penuh, sedangkan pada 30° berarti katub pada luaran tangki diputar 30° dengan arah menutup, begitu juga pada kondisi bukaan katub luaran tangki 45° , katub luaran tangki diputar menutup sebesar 45° dan pada kondisi bukaan katub luaran tangki 60° , katub luaran tangki diputar menutup sebesar 60° .

3.6.2 Pengaturan Data Akuisisi

Sebelum melakukan percobaan terlebih dahulu melakukan pengaturan data akuisisi dengan menggunakan software *VibraQuest* dalam melakukan percobaan

ketika mengambil data pada saat pengujian. Berikut ini adalah tabel 3.1 pengaturan data akuisisi.

Tabel 3.1 Pengaturan data akuisisi *software VibraQuest*

<i>Type Steady State</i>	
<i>DAQ Control</i>	<i>DAQ Information</i>
➤ <i>Frequency limit</i>	➤ <i>df</i>
2000	0.625
➤ <i>Spec lines</i>	➤ <i>Sampling rate (sampling/s)</i>
3200	5120
➤ <i>Block</i>	➤ <i>Rows per block</i>
5	8192
➤ <i>Windowing</i>	➤ <i>Sec per block</i>
<i>Hanning</i>	1.600
	➤ <i>Total rows</i>
	40960
	➤ <i>Total second</i>
	8

Dimana:

- *Frequency limit.*
Batas dari frekuensi. Nilai data yang sebenarnya berupa angka.
- *Spectra lines.*
Resolusi dari spektrum(delta-f), membagi frekuensi dengan batas angka.
- *Block.*
Berapa banyak data yang di ambil ketika percobaan dimulai.
- *Df(Delta-f).*
Resolusi dari spektrum.
- *Sampling rate.*
Seberapa cepat sampel data yang diambil tiap detik.
- *Rows per block*

Ukuran dari blok atau berapa banyak data poin dalam satu blok.

- *Sec per block.*

Berapa lama waktu blok dalam mengambil data sampai terakhir.

- *Total rows.*

Banyaknya data poin yang di ambil tiap baris.

- *Total second.*

Total waktu dalam pengujian ketika merecord data.